4Б

УДК 004.942

А.В. Бухановский, С.В. Иванов, Ю.И. Нечаев
Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики
197101, Россия, пр. Кронверкский, 49, г. Санкт-Петербург, *avb_mail@mail.ru*

Связь теории планирования эксперимента и теории размерностей и подобия при моделировании динамических ситуаций в интеллектуальных системах исследовательского проектирования

A.V. Boukhanovsky, S.V. Ivanov, Yu.I. Nechaev
St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics
197101, Russia, Saint Petersburg, Kronverkskiy pr., 49

Combination of the Experimental Design Theory and the Dimension and Similarity Theory at Modelling Dynamic Situations in Intelligence Systems of Design Study

А.В. Бухановський, С.В. Іванов, Ю.І. Нєчаєв
Санкт-Петербурзький державний університет інформаційних технологій, механіки й оптики
197101, Росія, пр. Кронверкський, 49, м. Санкт-Петербург

Зв’язок теорії планування експерименту й теорії розмірностей та подібності при моделюванні динамічних ситуацій в інтелектуальних системах дослідного проектування

В статье обсуждаются вопросы взаимосвязи теории планирования эксперимента и теории размерностей и подобия в интеллектуальных системах (ИС) исследовательского проектирования морских судов. Особое внимание обращается на решение проблемы планирования эксперимента при моделировании динамических ситуаций в рамках принципа конкуренции в условиях неопределенности и неполноты исходной информации.
Ключевые слова: интеллектуальные системы принятия решений, теория размерностей и подобия

The problems of interrelation of the experimental design theory and the dimension and similarity theory in intelligence systems of design study of marine ships are discussed. The special attention addresses to solving the problem of planning experiment at modelling dynamic situations within the limits of competition principle in the conditions of uncertainty and incompleteness of the initial information.
Key words: intelligent systems decision making, dimensional theory

У статті розглядаються питання взаємозв’язку теорії планування експерименту й теорії розмірностей та подібностей в інтелектуальних системах (ІС) дослідного проектування морських суден. Особлива увага звертається на розв’язання проблеми планування експерименту при моделюванні динамічних ситуацій в рамках принципу конкуренції в умовах невизначеності й неповноти вихідної інформації.
Ключові слова: інтелектуальні системи прийняття рішень, теорія розмірностей і подібності

1. Концепция планирования эксперимента в задачах исследовательского проектирования

Рассмотрим особенности реализации методов планирования эксперимента в рамках принципа конкуренции [1-13]. Общая схема, характеризующая интегрированную среду исследовательского проектирования при реализации этого принципа, представлена на рис. 1. Здесь приведены функциональные блоки, построенные на основе стандартных и генетических алгоритмов, нечетких и нейронечетких систем [4], [6]. Входом для системы и модели служат данные физического эксперимента, выполненные на стадии исследовательского проектирования.

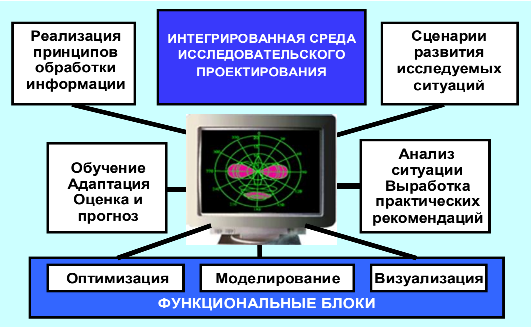


Рисунок 1 – Поток информации при реализации интегрированной среды исследовательского проектирования

Математическая формулировка задачи планирования эксперимента при моделировании взаимодействия морского динамического объекта (ДО) в сложной среде имеет вид [9], [11]:

1. Вид функции отклика $f(x, a)$ известен, и в процессе эксперимента необходимо определить неизвестные оценки параметров $a_1,\ldots a_k$.

2. Из априорной информации известно, что искомая функция $f(x, a)$ совпадает с одной из функций $f_1(x, A_1),\ldots,f_S(x, A_S)$. Требуется определить, какая из указанных функций предпочтительна, и найти неизвестные оценки. Причем размерность векторов $A_1, A_2,\ldots,A_s$ может быть различной в зависимости от поставленной задачи.

$$A=\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \ldots \\ a_k \end{bmatrix}\cdot\ f(x,a)=\begin{cases} f_1(x,A_1) \\ f_2(x,A_2) \\ \ldots \\ f_s(x,A_s) \end{cases}. \qquad (1)$$

Стратегию эффективного экспериментирования в рассматриваемых случаях характеризуют два повторяющихся цикла. Один их них описывает процедуру оценки параметров модели, другой – стратегию дискриминирующего эксперимента.

Если в процессе вычислительного или физического эксперимента решается задача оптимизации, то стратегия эффективного экспериментирования может быть реализована методом крутого восхождения. Эта задача имеет место не только в задачах планирования эксперимента для стандартных моделей, но и для нейронных сетей (параметрический синтез) и генетического алгоритма (многокритериальная оптимизация).

В зависимости от характера исследования эксперимент можно выполнить либо в виде последовательной серии опытов, либо случайным образом (рандомизированный эксперимент). В первом случае задается верхнее или нижнее значение изучаемой

величины, изменяя которое через выбранный интервал, можно установить другое ее предельное значение. При рандомизированном эксперименте выбранные значения независимой переменной чередуются случайно [11].

При реализации интеллектуальных технологий в ИС исследовательского проектирования на базе высокопроизводительных средств вычислений учитываются общие принципы и структура информационной модели, обеспечивающей анализ и прогноз исследуемых ситуаций. Такая модель разрабатывается в рамках нечеткого логического базиса и формализованных методов оценки взаимодействия ДО в различных условиях эксплуатации, в том числе и в экстремальных ситуациях [4], [6], [9].

В настоящей статье рассматривается приложение разработанной концепции интерпретации текущих ситуаций в сложных динамических средах [7]. Обсудим некоторые соображения по организации и проведению исследований на основе методов теории размерностей и подобия в сочетании с особенностями планирования эксперимента. Доработка и приспособление стандартных планов эксперимента осуществляются на стадиях стратегического и тактического планирования.

Стратегическое планирование эксперимента включает выбор вида математической модели с учетом числа варьируемых факторов и их уровней, а также взаимодействия факторов и нелинейных эффектов. При решении оптимизационной задачи дополнительно учитываются экстремальные условия. *Тактическое планирование* предполагает решение вопросов точности и стоимости эксперимента (сходимость решения, начальные условия, размер выборки, методы уменьшения дисперсии и другие вопросы).

Физико-математическое моделирование на основе стратегического и тактического планирования реализуется в два этапа:

– на первом этапе (предварительное планирование) устанавливаются цели эксперимента, определяется моделируемая система взаимодействия судна с внешней средой и выбирается математическая модель.

– второй этап предусматривает анализ априорных данных вместе с результатами измерений и разработку плана целенаправленного, последовательного получения необходимых для интерпретации текущей ситуации данных.

На приведенных этапах исследования рассматриваются также специфические требования к экспериментальным данным. Это делается для того, чтобы при окончательном стратегическом и тактическом планировании все ограничения на время работы вычислительного блока ИС были приведены в соответствие с имеющимися практическими условиями.

Интеллектуальные комплексы физико-математического моделирования. Разработка новых типов морских ДО и плавучих технических средств освоения океана связана с широким использованием методов и средств моделирования. Технической базой моделирования являются специализированные автоматизированные комплексы [3]. Эти комплексы имеют многоуровневую иерархическую структуру с многокритериальным регулированием (рис. 2). Информационная база комплекса содержит множество специализированных баз знаний о целевом назначении комплекса, его функциональных возможностях и особенностях их применения в различных режимах работы, а также о методах определения оценок его характеристик и текущих состояний.

Функционирование комплекса осуществляется системой управления на основе высокопроизводительной вычислительной техники. Эта система является полифункциональной и обеспечивает работу комплекса таким образом, чтобы реакция на внешние сигналы от датчиков измерительной системы соответствовала бы требованиям, предъявляемым при формулировке целей создания комплекса. Многообразие выпол-

няемых задач управления, решение которых ведется с использованием методов искусственного интеллекта, позволяет рассматривать такую экспериментальную установку, как *интеллектуальный комплекс* физико-математического моделирования.

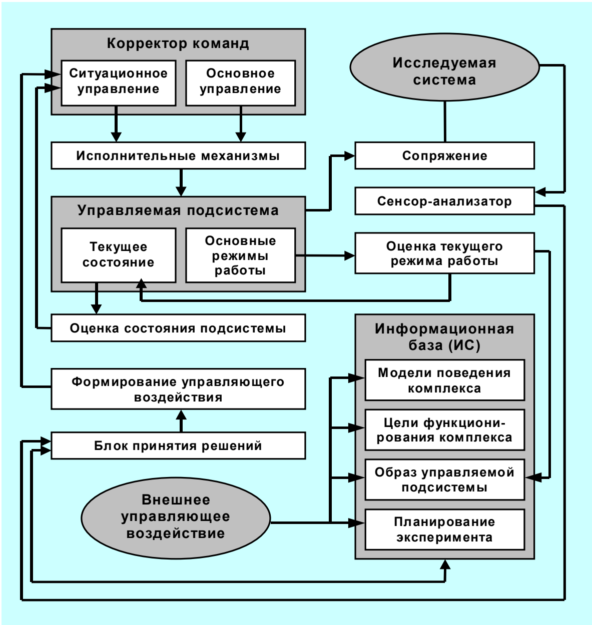


Рисунок 2 – Цикл управления интеллектуального комплекса физико-математического моделирования

Важной особенностью комплекса является широкое использование современных компьютерных технологий обработки информации в сочетании с методами теории размерностей и подобия и планирования эксперимента.

2. Теория размерностей и подобия в ИС исследовательского проектирования

Проблема планирования эксперимента в ИС исследовательского проектирования непосредственно связана с теорией размерностей и подобия. Условия подобия двух явлений можно сформулировать в виде следующих утверждений [13]:

– Для каждого момента времени в одном явлении (натура) найдется такой момент времени во втором явлении (модель), если во всех соответствующих точках пространства (геометрических подобных) сохраняется постоянство масштабов различной физической природы и других характеристик, рассматриваемых в данной задаче.

– Масштаб интервалов времени между соответственными моментами времени не изменен.

Формула размерности рассматривается при этом как условие связи между масштабами времени в двух подобных явлениях. Обозначая индексом «н» явление, относящееся к натуре, и индексом «м» – к модели, можно записать: масштаб длины $k_l = L_{0M}/L_{0H}$, масштаб скорости $k_v = v_M/v_H$, масштаб плотности $k_\rho = \rho_M/\rho_H$. Таким образом, по аналогии с $[v] = LT^{-1}$ *и* $[j] = LT^{-2}$ можно записать $k_v = k_l k_t^{-1}$ *и* $k_j = k_l k_t^{-2}$.

Связь между масштабами сил различной физической природы позволяет выделить критерии подобия для исследуемого явления. Так, например, для центробежной

силы и вязкого трения связь между масштабами длины, скорости и коэффициента вязкости устанавливается на основе законов Ньютона, а масштаб сил тяжести выражается из условия $G = mg$ [6]:

$$k_R = k_\rho k_l^3 k_v^2 k_l^{-1} = k_\rho k_l^2 k_v^2 .$$

$$k_F = k_\rho k_v k_v k_l .\; k_G = k_m k_g = k_\rho k_l^3 k_g . \tag{2}$$

В подобных явлениях масштабы сил различной физической природы должны быть одинаковы. Из этого следует, что

$$k_R = k_F \;и\; k_R = k_G . \tag{3}$$

Приравнивая полученные выражения для k_R и k_F, находим:

$$\frac{L_{0M}\nu_M}{L_{0H}\nu_H} = \frac{\nu_M}{\nu_H}, \quad \frac{v_M L_{0M}}{\nu_M} = \frac{v_H L_{0H}}{\nu_H} = \mathrm{Re}\,. \tag{4}$$

Приравнивая k_R и k_G, получаем:

$$\left(\frac{v_M}{v_H}\right)^2 = \frac{L_{0M}}{L_{0H}}\cdot\frac{g_M}{g_H}; \quad \frac{v_M}{\sqrt{g_M L_{0M}}} = \frac{v_H}{\sqrt{g_H L_{0H}}} = Fr. \tag{5}$$

Равенства (4) и (5) указывают, что при подобных явлениях безразмерные комбинации *Re* и *Fr*, характеризующие числа Рейнольдса и Фруда, должны быть одинаковы для модели и натуры. Однако практическая невозможность обеспечения этого требования порождает проблему постановки физического эксперимента и проблему адекватности при интерпретации полученных результатов. Решение этих проблем достигается за счет выбора определяющего критерия (в большинстве случаев это число Фруда) и условий проведения эксперимента: путем моделирования динамики взаимодействия с использованием спектра возмущений на основе концепции климатических спектров в специальных мореходных опытовых бассейнах, а также в естественных условиях – на основе самоходных радиоуправляемых моделей. При этом проблема адекватности решается в рамках стандартных процедур обработки результатов систематических испытаний и данных натурного эксперимента.

Уменьшение влияния неопределенности при проведении экспериментальных исследований и разработке технических решений в ИС исследовательского проектирования достигается путем перевода задачи в нечеткий логический базис [1]. Среди имеющихся подходов к решению такой задачи следует выделить алгоритм, описанный в работе [10]. Формирование иерархической структуры свойств сложной системы в соответствии с этим алгоритмом может быть реализовано в такой последовательности:

1. Каждой типовой ситуации C_i $(i = 1,\dots,m)$ ставится в соответствие ряд приоритетов $I_i = \{1,\dots,n\}$ и вектор приоритетов $V_i = \{V_{i1},\dots,V_{in})$ свойств системы.

2. Определяется вектор коэффициентов $\Lambda_i = \{\lambda_{i1},\dots, \lambda_{in}\}$, компоненты которого находятся по зависимости:

$$\lambda_{iq} = \prod_{j=q}^{n} V_{ij} \bigg/ \sum_{i=1}^{m}\prod_{j=q}^{n} V_{ij}\,, \tag{6}$$

где λ_{iq} – вес q-го свойства в i-й типовой ситуации.

3. Рассчитываются обобщенные веса свойств системы:

$$a_q = d_q \bigg/ \sum_{q=1}^{n} d_q\,, \tag{7}$$

где d_q – уровень изменчивости j-го свойства в пределах рассматриваемой задачи, определяемый на основании энтропийного подхода

$$d_q = 1 + (1/m)\sum_{i=1}^{m}\left(\lambda_{iq}\ln(\lambda_{iq})\right). \tag{8}$$

4. Строится иерархическая структура свойств с учетом полученных оценок обобщенных весов.

Концепция эффективного экспериментирования позволяет сформулировать общий порядок анализа задач физического моделирования с позиций теории размерностей и подобия [11], [13]:

– постановка задачи и выделение параметров, определяющих исследуемое явление.

– составление в неявном виде общей функциональной зависимости, связывающей зависимую переменную с определяющими параметрами.

– преобразование уравнений к безразмерному виду и выделение критериев подобия, характеристика условий подобия и определяющих критериев.

– проведение экспериментов с моделью, пересчет полученных данных на натуру и оценка адекватности.

Отмечая важность использования теории размерностей и подобия при постановке и анализе научного эксперимента на стадии исследовательского проектирования, следует отметить некоторые особенности, связанные с применением этого метода.

Необходимо иметь в виду, что наибольшую значимость в научном исследовании представляют *экспериментальные данные*, т.е. непосредственно наблюдаемые и регистрируемые значения физических параметров. Эти данные составляют *основное содержание эксперимента*. Все остальное, в том числе и безразмерные комбинации исходных физических величин, является производным и играет вспомогательную роль для уменьшения объема эксперимента и более компактного представления результатов исследования. Короче говоря, применение теории размерностей должно иметь свою меру и не должно быть самоцелью исследования. В противном случае этот эффективный метод может превратиться в средство затушевывания сущности явления, особенно если оно сложное и малоизученное [7], [11].

В заключение следует отметить важность практического приложения методов теории размерностей в задачах исследовательского проектирования. Используя эти методы, можно находить связи между величинами. Искомая функциональная зависимость устанавливается с точностью до константы, которая определяется в процессе эксперимента или исходя из теоретических соображений. Действительно, положение аксиомы теории размерностей о том, что по обе стороны знака равенства должны находиться величины с одинаковой размерностью, может оказать существенную помощь при изучении физических явлений и решении различных задач взаимодействия ДО с внешней средой. Пусть, например, если нас интересует вопрос о связи между элементами плоских волн. Запишем общую функциональную зависимость для скорости распространения волн:

$$c = f(\lambda, h_w, \rho, g). \tag{9}$$

Здесь λ и h_w – длина и высота волны; ρ и g – плотность жидкости и ускорение силы тяжести. Так как скорость имеет размерность м/с, из величин, определяющих «с», нельзя образовать безразмерной комбинации, в которую входила бы плотность. Действительно, размерность плотности $[\rho]$ = кг·с^2/м^4, и никакой комбинацией указанных величин нельзя исключить размерность силы, так как

$$[l] = L,\ [h_w] = L,\ [g] = LT^{-2}. \tag{10}$$

Следовательно, размерность скорости волны определяется комбинацией:

$$[c] = [g]^{1/2}L^{1/2}. \tag{11}$$

Составим безразмерную комбинацию:

$$\frac{c}{\sqrt{g\lambda}} = f\left(\frac{h_w}{\lambda}\right),\quad c = f\left(\frac{h_w}{\lambda}\right)\sqrt{g\lambda}. \tag{12}$$

Дальнейшее уточнение этого выражения может быть сделано, если ограничиться линейной постановкой задачи, которая обычно применяется в теории волн малой амплитуды. В линейной постановке скорость не зависит от высоты волны, поэтому

$$c = const\sqrt{g\lambda}\ . \qquad (13)$$

Значение константы не может быть определено из теории размерностей. Она равна $1/\sqrt{2\pi}$ и окончательно

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}\ . \qquad (14)$$

Если физическая величина не зависит ни от одной из основных величин, то она *безразмерна*. Исследуя в процессе эксперимента зависимость некоторой физической величины от ряда определяющих параметров (независимых переменных), необходимо так спланировать эксперимент, чтобы, достаточно полно описывая изучаемое явление, представить полученный результат в компактной форме. Методы теории размерностей и подобия использованы при разработке критериального базиса, обеспечивающего интерпретацию текущих, в том числе и экстремальных ситуаций при решении проектных задач, а также при проведении экспериментальных исследований на стадии исследовательского проектирования.

3. Стратегия и тактика эксперимента на стадии исследовательского проектирования

Если цель эксперимента достигнута, то необходимо осуществить интерпретацию полученных результатов. В процессе интерпретации выясняется, соответствуют ли данные исходным теоретическим представлениям об изучаемом явлении. При наиболее благоприятной ситуации, когда в процессе исследования был реализован план эксперимента и достигнута эффективная оценка параметров исходной математической модели, интерпретация результатов сводится к переводу модели на язык экспериментатора. По полученным данным устанавливается влияние рассматриваемых факторов, которые предварительно располагаются в ряд по степени их важности. Незначимые факторы отбрасываются. После чего оценивается характер влияния значимых факторов с учетом коэффициентов найденной функциональной зависимости. Далее переходят к анализу эффектов взаимодействия факторов, квадратичных членов и т.п. В зависимости от сочетания возможных действий и ситуаций получаются различные варианты решения. Из этих решений выбирается вариант, наиболее удовлетворяющий всем требованиям в соответствии с целью проводимого эксперимента [11].

Информация, установленная при использовании окончательно отобранной в процессе эксперимента с математической моделью, должна быть простой и доступной, а результаты решения должны содержать конкретные ответы на сформулированные исходные предпосылки. Очевидно, что в полной мере интерпретация возможна только после всестороннего анализа материалов испытаний. Окончательный результат получается в виде либо адекватной интерполяционной модели, либо оптимальных условий работы исследуемого объекта. Поэтому необходимо провести предварительный анализ результатов эксперимента. В процессе анализа выясняется общая картина изменения регистрируемых параметров, переводятся и преобразуются данные в соответствующие масштабы, выявляются и исключаются аномальные, искаженные сигналы и резко отклоняющиеся значения.

Только после этого можно приступить к детальному анализу исследуемого явления, поскольку некачественный материал может практически свести к нулю все работу

по планированию и проведению эксперимента. При значительном количестве выбросов и искаженных сигналов в исходной информации необходимо реализовать новый план и провести контрольный эксперимент. Если ситуация при этом не меняется, то следует реализовать новый план на новой экспериментальной установке. Окончательная стадия предварительной обработки информации – обнаружение и исключение выбросов, тренда, смещения нуля и других возможных искажений. Остановимся более подробно на исключении выбросов.

В процессе эксперимента могут наблюдаться результаты, резко отличающиеся от предыдущих измерений. Примеры появления резко отклоняющихся значений – неудовлетворительный контроль или неисправность прибора. Например, выбросы возникают при кратковременном увеличении напряжения в сети, изменении температуры, влажности. Необходимо иметь в виду, что появление резко отклоняющихся значений связано иногда с особенностями исследуемой функциональной зависимости. Такие эффекты имеют место в экспериментах, связанных с изучением характера течения жидкости (ламинарное, турбулентное), «кризиса сопротивления» шара и цилиндра, отрывах пограничного слоя и других сложных физических экспериментах, связанных с исследованием взаимодействия ДО с внешней средой.

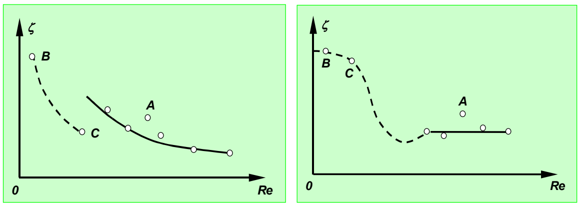
Помимо физической природы резко отклоняющиеся значения могут иметь и статистическую природу. Статистические критерии для исключения выбросов основаны на допущении, что ошибки эксперимента распределены по нормальному закону. Имеются также критерии для распределений, отличных от нормального. Для проверки гипотезы о том, что наибольшее значение x_{max} или наименьшее x_{min} принадлежит той же выборочной совокупности, как и все *n-1* наблюдений, используют различные статистические критерии, эти критерии позволяют решать задачу корректировки результатов эксперимента. Наиболее прост и удобен в оперативном применении при контроле данных критерий Шовене [12], основанный на предложении, что какой-либо отсчет из вариационного ряда n можно отбросить, если

$$\frac{\bar{x} - x_{\min}}{s_x} > t_n \text{ или } \frac{x_{\max} - \bar{x}}{s_x} > t_n. \quad (15)$$

Здесь $\bar{x}$ и s_x^2 – оценки математического ожидания и дисперсии без учета сомнительного члена вариационного ряда x_{min} или x_{max}; t_n – коэффициент, определяемый в зависимости от числа экспериментов n и уровня значимости. Имеются и другие критерии, основанные на вычислении вероятности того, что аномальное отклонение может возникнуть случайно среди данных, принадлежащих исследуемой совокупности [11].

Существует важное правило, которым следует руководствоваться при отбрасывании: отклоняющиеся точки необходимо исключать, пользуясь стандартными критериями в том случае, если они находятся в средней части графика. Для выяснения этой особенности рассмотрим положение экспериментальных точек при исследовании зависимости коэффициента трения глубокопогруженной пластины от числа Рейнольдса (рис. 3А), широко используемой в задачах гидродинамики судна [13]. Очевидно, что точка *A*, имеющая большое отклонение и явно выпадающая из общего массива данных, должна быть проверена на возможность исключения. В то же время точки *B* и *C* относятся к совершенно другой кривой, соответствующей ламинарному режиму обтекания. Аналогичные рассуждения можно применить к анализу зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса, установленной в опытах по обтеканию шара или цилиндра (рис. 3В). Здесь точки *B* и *C* характеризуют начало

так называемого «кризиса сопротивления», и отбрасывание их приведет к потере чрезвычайно важной информации об этом физическом явлении.



A B

Рисунок 3 – Кривые изменения коэффициента сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса: A – глубоко погруженная пластина; B – шар, цилиндр

Важные эффекты и закономерности установлены при проведении экспериментальных исследований, связанных с изучением физических картин взаимодействия судна с внешней средой для критических ситуаций, характеризующих явление брочинга, а также удара разрушающейся и экстремальной волны [4], [6], [7], [9].

Управление дистанционным экспериментом. Формальные процедуры при функционировании ИС исследовательского проектирования предполагают широкое использование априорной информации, а также методов физичиеского и математического моделирования. Теоретической базой моделирования являются специализированные автоматизированные комплексы управления дистанционным экспериментом (рис. 4). Комплекс ориентирован на решение широкого спектра задач сбора, обработки, передачи и представления информации в условиях удаленного доступа к ее источникам. Управление распределенными элементами комплекса обычно осуществляется управляющими серверами через среду вычислительных сетей Internet [1].

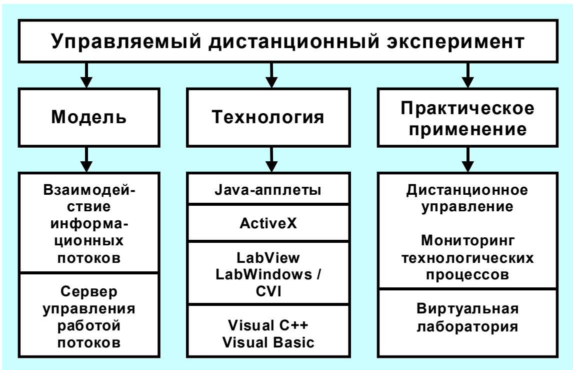


Рисунок 4 – Структурная схема управляемого дистанционного эксперимента

Системы управления обеспечивают информационные и вспомогательные функции. Для решения этих задач на основе априорной информации разрабатывается нечеткая формальная система принятия решений при выборе альтернатив в рамках концепции Data Mining [2], [8]. Формирование системы осуществляется на основе парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [7].

Виртуальное пространство организации знаний. Одним из эффективных направлений интеграции ИС исследовательского проектирования и технологии хранилищ данных является повышение эффективности интеллектуальной поддержки проектных решений. Организация информации осуществляется с использованием *интегрированных платформ* (виртуального пространства интеграции знаний). На основе такой интеграции через модуль Knowledge Management реализуется единый

доступ к данным, обеспечивающий управление, классификацию и представление общего набора сервисов для разнородных видов информации.

На основе хранилища данных (рис. 5) могут быть построены гиперкубы данных, которые включают необходимые измерения в зависимости от потребностей конструктора при решении аналитических задач.



Рисунок 5 – Взаимодействие ИС исследовательского проектирования с хранилищем данных

На рис. 6 изображен гиперкуб данных (Data Hypercube) для рассматриваемой проблемной области. Он представляет собой структуру «показатели – объекты – время» (показатели и объекты называют измерениями – Dimensions), при построении которых образуются пустые ячейки (Emply Call) [8].

Формальное описание модели гиперкуба представляется в виде следующих множеств: $D = \{d_1,...,d_n\}$ – множество измерений (Set Dimensions) гиперкуба; $M_{di} = \{m_{1i},...,m_{ki}\}$, $i = 1,..., n$ – множество меток (Set Members) измерения; $M = M_{d1} \ldots M_{dn}$ – множество меток гиперкуба; $D^* \subseteq D$ – множество фиксированных измерений; $M^* \subseteq M$ – множество фиксированных меток.

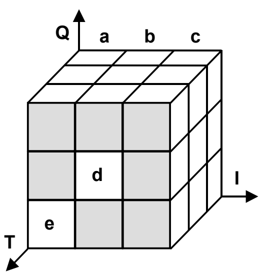
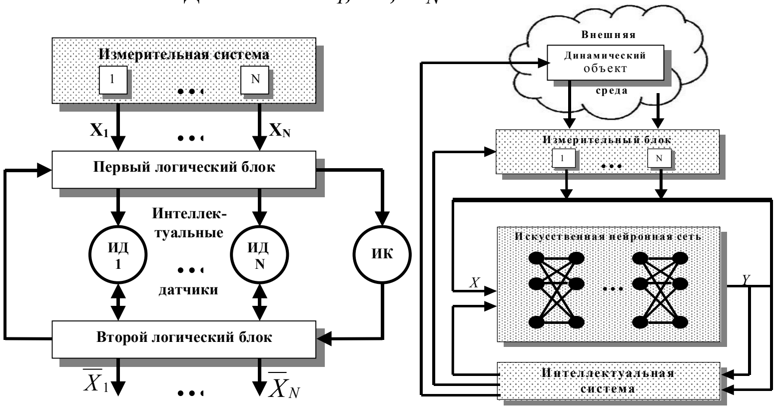


Рисунок 6 – Гиперкуб данных: a, b, c – метки; e, d – пустые ячейки

Каждой ячейке гиперкуба данных соответствует единственно возможный набор меток измерений (Members Dimensions). Ячейка может быть пустой (не содержать данных) или содержать значение показателя – меру (Value, Measure). Метка $m_{ji} \in M$ задает гиперплоскость сечения гиперкуба данных для измерения $d_i \in D$. Множество фиксированных меток $M^* \subseteq M$ задает множество гиперплоскостей гиперкуба данных, соответствующее множеству фиксированных измерений $D^* \subseteq D$. Пересечение этих гиперплоскостей определяет множество ячеек (область) гиперкуба данных, интересующих конструктора. При работе с гиперкубом данных конструктор задает множества D^* и M^* путем последовательного выбора меток m_{ji}. Фиксируя метку $m_{ji} \in M$, соответствующую измерению $d_i \in D$, конструктор определяет интересующую его область гиперкуба данных.

Интеллектуальные датчики. Важным результатом исследований, связанных с повышением качества функционирования измерительных систем, является создание специальных интеллектуальных датчиков [4], [6]. Развитию аналитического подхода при синтезе интеллектуальных датчиков способствует создание алгоритмов оптимальной обработки данных на основе сложных моделей входных воздействий на датчик. В качестве конкурирующей стратегии рассматривается способ реализации интеллектуального датчика на основе искусственных нейронных сетей (ИНС).

Архитектура отказоустойчивой измерительной системы [5] с «интеллектуальным» датчиком (ИД) представлена на рис. 7. Система содержит два логических блока. Первый блок устанавливает неисправность и настраивает моделируемую систему обеспечения функционирования нужного датчика. В частности для интеллектуального датчика на основе ИНС осуществляется настройка весовых коэффициентов нейронных связей. Второй логический блок обеспечивает достоверность информации интеллектуальных датчиков $ИД_1,\ldots,ИД_N$. Интеллектуальный контроллер ИК устанавливает факт возникновения отказа датчиков $X_1, \ldots, X_N$.



А В

Рисунок 7 – Схема отказоустойчивой измерительной системы (А); ИС управления динамическим объектом с интеллектуальным датчиком (В)

Алгоритмы функционирования ИД разрабатываются с учетом реальных данных, характеризующих поведение исследуемого ДО в заданных условиях эксплуатации [5].

При применении самоорганизующейся ИНС каждому входному параметру $x_i (i = 1,n)$ сопоставляется измерение многомерного пространства. Размерность этого пространства равна числу параметров *n*, возможные значения которых задаются специальной шкалой. Задача состоит в определении свойств точек $xj = (x_{j1}, \ldots, x_{jn})$ *n*-мерного пространства. Величина характеризует значение входного параметра *i* точки *j* в примерах, используемых при обучении ИНС. Точки многомерного пространства образуют класс связанных областей точек, обладающих определенными свойствами. При обучении ИНС этот класс запоминается и используется при функционировании ИС для решения проектных задач.

Таким образом, создается искусственная интеллектуальная среда, включающая в себя множество функциональных подсистем в виде совокупности ИД. Обучение ИНС осуществляется в составе ИС. Система принятия решений по использованию ИД реализуется на основе нечеткого логического базиса. Нечеткий вывод осуществляется с помощью таблиц принятия решений. Разработка таких таблиц ведется для нормальных условий эксплуатации и при отказе датчиков (нештатные режимы).

Сравнительный анализ моделей сигналов, реализуемых ИД на основе ИНС, и фактических результататов и используемых в процессе экспериментальных исследований ИС, проводится на основе статистического критерия:

$$Ks = (1/\overline{y})[(y_i - \overline{y})^2 / n]. \quad (16)$$

Этот критерий выражает в стандартизированном масштабе степень устойчивости исследуемых динамических процессов: отношение среднеквадратического отклонения к среднему уровню $\bar{y}$.

Эксперименты, проведенные с использованием реальных данных о функционировании ИС обеспечения безопасности мореплавания с помощью датчиков бортовой и килевой качки, свидетельствуют о практической реализуемости разработанного подхода. Замена датчика бортовой качки ИД, генерирующим случайный существенно нелинейный процесс, позволила [6] восстанавливать характеристики морского волнения и параметров качки, а также обеспечивать работу механизма логического вывода при идентификации ситуаций, связанных с возникновением резонансных режимов качки при движении плавучего ДО с различными курсовыми углами на волнении в условиях развивающегося шторма.

Для надежного функционирования ИД важное значение имеет информация, накапливаемая в процессе эксплуатации ИС. На базе этой информации производится окончательная корректировка алгоритмов, заложенных в формализованную систему знаний при построении ИД. Практическая реализация разработанного подхода связана с проблемой старения информации, что требует поддержания работоспособности ИС на базе информации о поведении плавучего ДО в различных условиях эксплуатации.

Заключение

Таким образом, обеспечивая получение максимальной информации при минимальных затратах, теория планирования эксперимента в соединении с теорией размерностей и подобия позволяют разработать стратегию сбора экспериментальных данных для синтеза технических решений, выдвижения новых идей и гипотез на стадии исследовательского проектирования. При этом могут оказаться полезными рекомендации, выдаваемые специально разработанными ИС по планированию эксперимента.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (ГК № П295 от 30.04.2010, ГК № П976 от 27 мая 2010, ГК № 02.740.11.0837 от 11.06.2010). Результаты работ использованы в рамках проекта реализации Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Литература

1. Андреев С.В. Интеллектуальный WEB-сервер управления дистанционным экспериментом / С.В. Андреев, В.П. Шкодырев // Труды Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2001. – Санкт-Петербург, 2001. – Т. 1. – С. 274-277.
2. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / [Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И.]. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2004.
3. Белов В.С. Основной цикл управления интеллектуального комплекса физико-математического моделирования / В.С. Белов // Труды 4-го Международного симпозиума «Интеллектуальные системы INTELS-2000. – Москва, 2000. – С. 266-268.
4. Бортовые интеллектуальные системы. Ч. 1. Авиационные системы. Ч. 2. Корабельные системы. – М. : Радиотехника, 2006. Ч. 3. Системы корабельной посадки летательных аппаратов. – М. : Радиотехника, 2008.
5. Отказоустойчивые системы управления сложными динамическими объектами с использованием ИНС / С.С. Валеев, В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов, Жан-Гуо Сун [и др.]. // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – № 1. – 2000. – С. 32-35.
6. Нейрокомьютеры в интеллектуальных технологиях XXI века. – М. : Радиотехника, 2012.

7. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений / Нечаев Ю.И. – Санкт-Петербург : Арт-Экспресс, 2011.
8. Рощупкина В.Д. Интеллектуальный анализ данных в бизнес-приложениях: подход фирмы Cognos / В.Д. Рощупкина, М.Д. Шапот // Новости искусственного интеллекта. – 1997. – № 4. – С. 25-46.
9. Системы искусственного интеллекта с интеллектуальных технологиях XXI века. – Санкт-Петербург : Арт-Экспресс, 2011.
10. Филюстин А.Е. Учет фактора неопределенности в задаче оценки технического уровня сложной технической системы / А.Е. Филюстин, К.В. Жильцов, В.А. Калистратов // Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-98. – Санкт-Петербург, 1998. – Т. 1. – С. 107-108.
11. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. и др. – М. : Мир, 1977.
12. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Шенк Х. – М. : Мир, 1972.
13. Эпштейн Л.А. Методы теории размерностей подобия в задачах гидромеханики судов / Эпштейн Л.А. – Л. : Судостроение, 1970.

Literatura

1. Andreev S.V. Tr. Mezhdunarodnoj konferencii po mjagkim vychisleniem i izmerenijami SCM-2001. Sankt-Peterburg. 2001. T.1. S.274-277.
2. Barsegjan A.A. Metody i modeli analiza dannyh: OLAP i Data Mining. Sankt-Peterburg. BHV-Peterburg, 2004.
3. Belov V.S. Tr.4-go Mezhdunarodnogo simpoziuma “Intellektual’nye sistemy INTELS-2000”. Moskva. . 2000. S. 266-268.
4. Bortovye intellektual’nye sistemy. Ch. 1. Aviacionnye sistemy. Ch. 2. Korabel’nye sistemy. M.: Radiotehnika, 2006. Ch 3. Sistemy korabel’noj posadki letatel’nyh apparatov. M.: Radiotehnika. 2008.
5. Valeev S.S. Nejrokomp’jutery: razrabotka i primenenie. M.: №1. 2000, S. 32-35.
6. Nejrokom’jutery v intellektual’nyh tehnologijah HHI veka. M.: Radiotehnika. 2012.
7. Nechaev Ju.I. Teorija katastrof: sovremennyj podhod pri prinjatii reshenij. Sankt-Peterburg: Art-Jekspress. 2011.
8. Roshhupkina V.D. Novosti iskusstvennogo intellekta. № 4. 1997. S. 25-46.
9. Sistemy iskusstvennogo intellekta s intellektual'nyh tehnologijah HHI veka. Sankt-Peterburg: Art-Jekspress. 2011.
10. Filjustin A.E. Sbornik dokladov mezhdunarodnoj konferencii po mjagkim vychislenijam i izmerenijam SCM-98. T.1. Sankt-Peterburg.1998. S. 107-108.
11. Hartman K.. Planirovanie jeksperimenta v issledovanii tehnologicheskih processov. M.: Mir. 1977.
12. Shenk H. Teorija inzhenernogo jeksperimenta. M.: Mir. 1972.
13. Jepshtejn L.A. Metody teorii razmernostej podobija v zadachah gidromehaniki sudov. L.: Sudostroenie. 1970.

Статья поступила в редакцию 05.06.2012.